

تحلیل آزمایشگاهی شدت اختلاط جریان غلیظ روی بستر متحرک

اعظم شریف‌نژاد*، سید محمود کاشفی‌پور و مهدی قمشی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۷/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۲/۲۶)

چکیده

مطالعه پدیده جریان غلیظ به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پدیده‌های مؤثر بر رسوبگذاری در مخازن سدها، امری ضروری به‌شمار می‌رود. از آنجا که بیشتر مطالعات انجام شده روی بستر صلب بوده است و به‌طور مشخص اثر بستر متحرک و تشکیل فرم بستر روی مشخصات جریان غلیظ دیده نشده است. از این‌رو در این تحقیق، با مطالعه آزمایشگاهی جریان غلیظ در دو شرایط بستر صلب و متحرک به بررسی مشخصه شدت اختلاط و پارامترهای هیدرولیکی مؤثر بر آن پرداخته شد. نتایج تحقیق نشان داد، تغییرات ضریب شدت اختلاط وابسته به تغییرات زبری بستر و نوع فرم‌های بستر تشکیل شده است. همچنین، ضریب شدت اختلاط جریان غلیظ با تغییرات تنش برشی بستر نسبت به بستر صلب، ابتدا تا حدود ۲۵ درصد کاهش یافته است و سپس با تشکیل فرم بسترهای بزرگ‌تر تا حدود ۳۰ درصد افزایش می‌یابد و مجدداً با افزایش قدرت جریان و حذف فرم‌های بستر کاهش می‌یابد. همچنین در مقایسه نتایج این تحقیق با نتایج سایر پژوهشگران نشان داده شد، تشکیل فرم‌های بستر تا ۵۰ درصد سبب افزایش ضریب اختلاط در یک ریچاردسون ثابت می‌شود.

واژه‌های کلیدی: جریان غلیظ، شدت اختلاط، عدد ریچاردسون، بستر متحرک، فرم بستر

۱. گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: a.sharifnezhad@yahoo.com

مقدمه

جریان غلیظ یک حرکت نسبی است که بین دو لایه سیال که حتی اختلاف کمی در چگالی دارند، ایجاد می‌شود. این اختلاف چگالی می‌تواند ناشی از دما، مواد معلق، مواد محلول و یا ترکیبی از آنها باشد. جریان غلیظ خصوصاً در مخازن سدها ضمن حرکت باعث فرسایش بستر شده و پس از رسیدن به بدنه سد، سبب رسوبگذاری خواهد شد که پیامدهای جبران‌ناپذیری نظیر کاهش عمر مفید مخازن، مسدود کردن آبگیرها و سازه‌های جانبی، ورود رسوبات در طرح‌های برق‌آبی، پایین آوردن بازده و افزایش هزینه‌های نگهداری و در نهایت اختلال در تأمین انرژی پاک و تجدیدپذیر را به همراه خواهد داشت. جریان غلیظ، جریانی با چگالی بالا (ρ_t) است که ذاتاً به دلیل اثر اختلاف چگالی دو سیال بر شتاب جاذبه به وجود می‌آید. شتاب ثقل مؤثر بر جریان به عنوان نیروی محرک در جریان غلیظ به صورت زیر بیان می‌شود (۱۴):

$$g' = g \frac{(\rho_t - \rho_a)}{\rho_a} = g C_S \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \quad (1)$$

در این رابطه C_S : غلظت حجمی متوسط رسوبات غیرچسبنده، ρ_a : دانسیته سیال پیرامون، ρ_t : دانسیته سیال غلیظ، ρ_w : دانسیته آب و ρ_s : دانسیته ذرات رسوب است.

تحقیقات زیادی بر مشخصات جریان غلیظ در شرایط بستر صلب آزمایشگاهی انجام شده است، اما این مطالعات در شرایط بستر متحرک و فرسایش‌پذیر بسیار کم انجام گرفته و تأثیر آن به طور مشخص بر مشخصات جریان غلیظ از جمله شدت اختلاط دیده نشده است. از آنجا که بستر متحرک خصوصاً با تشکیل فرم بستر عملکرد متفاوتی برای مشخصه‌های جریان غلیظ ایجاد می‌کند، بنابراین در این تحقیق تأثیر بستر متحرک بر مشخصه ضریب شدت اختلاط جریان غلیظ بررسی خواهد شد.

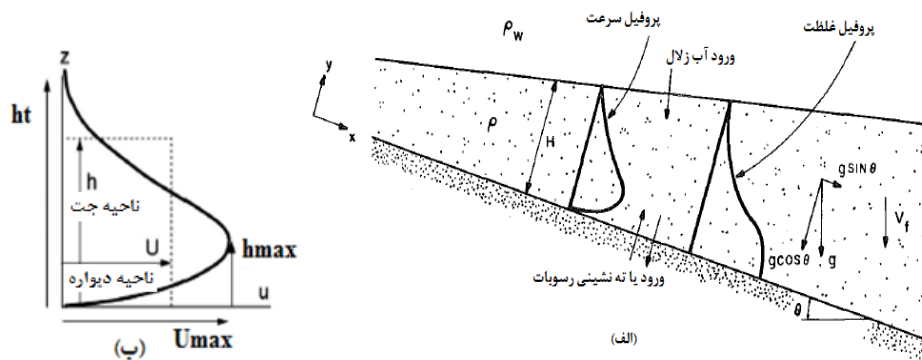
طبق تحقیقات کاهه (۱۰) روابط ارائه شده برای حرکت جریان غلیظ روی بستر صاف را نمی‌توان برای حرکت جریان غلیظ روی بستر زبر به کار برد و همچنین ورجاوند (۲۳) به این نتیجه دست یافت که در یک عدد ریچاردسون ثابت، با افزایش

ارتفاع زبری، ضریب شدت اختلاط افزایش می‌یابد. طبق تحقیق نلر و همکاران (۱۱)، در صورت حرکت جریان غلیظ روی بستر رسوبی رسوبات بستر از ناحیه زیر دماغه وارد پیشانی جریان غلیظ شوند و منجر به فرسایش بستر می‌شوند. پارکر و همکاران (۱۵) و گارسیا و پارکر (۷)، فرم‌های بستر شکل گرفته با جریان غلیظ نمکی را روی بستر رسوبی مشاهده کردند. راستلو و همکاران (۱۷)، در نتایج آزمایشگاهی خود روی بستر متحرک افزایش قابل توجهی در سرعت پیشانی به دلیل ورود رسوبات به درون جریان مشاهده کردند. سکویروس و همکاران (۱۸)، اثر زبری بستر و فرم‌های بستر بر پروفیل قائم سرعت و تغییرات چگالی جریان را مورد بررسی قرار دادند. همچنین در تحقیقات هانگ و همکاران (۹) و لو و همکاران (۱۳)، نشان دادند با حرکت جریان غلیظ روی بستر متحرک، الگوی جریان در قوس تغییر کرده و جهت جریان‌های ثانویه از ساحل داخلی به سمت ساحل خارجی کشیده می‌شود که ممکن است سبب تغییر جریان اصلی و تنش برشی کل و الگوی فرسایش و رسوبگذاری جریان شود. ژو و همکاران (۲۴)، نیز به بررسی و اندازه‌گیری شرایط هیدرولیکی و رسوبگذاری جریان غلیظ رسوبی در شرایط طبیعی در پایین‌دست دو جریان غلیظ رسوبی در آمریکا (Geneva) پرداختند.

تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد زبری بستر بر دینامیک جریان غلیظ مؤثر است و نتایج متفاوتی با شرایط بستر صلب حاصل خواهد شد. از آنجا که تحت شرایط هیدرولیکی خاصی در بستر رودخانه فرم بستر تشکیل می‌شود و فرم بستر نیز تأثیر مستقیم بر زبری و حمل مواد رسوبی دارد (۲۱)، این مسئله در الگوی فرسایش و رسوبگذاری و مقاومت در برابر جریان اثر خواهد گذاشت و تأثیر مستقیمی بر پروفیل سرعت جریان غلیظ و در نتیجه مشخصه شدت اختلاط خواهد داشت.

شدت اختلاط سیال پیرامون

جریان غلیظ در شرایط بستر متحرک از سه ناحیه تشکیل شده است: آب زلال پیرامون، آب کدر و ذرات بستر (شکل ۱-الف).



شکل ۱. الف) الگوی حرکت جریان غلیظ روی بستر متحرک (۱) و ب) شماتیکی از پروفیل سرعت در بدنه جریان غلیظ (۱۸)

یکنواخت فرض می‌شود، معادله بقای جرم به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$E_w = \left(\frac{\rho_w}{\rho_w + \rho_s} \right) \left(\frac{U_{j+1} - U_j}{X_{j+1} - X_j} \right) \quad (3)$$

در این رابطه J و $J+1$ بیانگر دو مقطع متوالی هستند و E_w ضریب اختلاط است.

پژوهشگران با انجام آزمایش‌های گوناگون روی جریان‌های غلیظ با جرم مخصوص‌های متفاوت دریافتند شدت اختلاط تابعی از عدد ریچاردسون است (۴). عدد ریچاردسون عکس عدد فرود دنیسمتریک است که به صورت زیر تعریف می‌شود (در این رابطه θ زاویه شیب بستر است):

$$Ri = \frac{g' h \cos \theta}{u^2} = \frac{1}{Fr_d^2} \quad (4)$$

بدین ترتیب در این تحقیق، اثر بستر متحرک و تشکیل و عدم تشکیل فرم بستر بر مشخصه شدت اختلاط و ارتباط با عدد ریچاردسون بررسی خواهد شد و پارامترهای مؤثر و نحوه اثربخشی آنها مشخص می‌شود.

فرم بستر و تنش برشی بستر متحرک

فرم بستر یا به عبارتی ناهمواری‌های بستر به شکل‌های مختلف در بستر رودخانه در اثر حرکت جریان به وجود می‌آید و تأثیر مستقیمی روی زبری بستر و در نتیجه مقاومت در مقابل جریان دارد. از آنجا که محاسبات دبی-اشل رودخانه و سرعت جریان کاملاً به تعیین زبری فرم بستر بستگی دارد، شناخت فرم بستر از

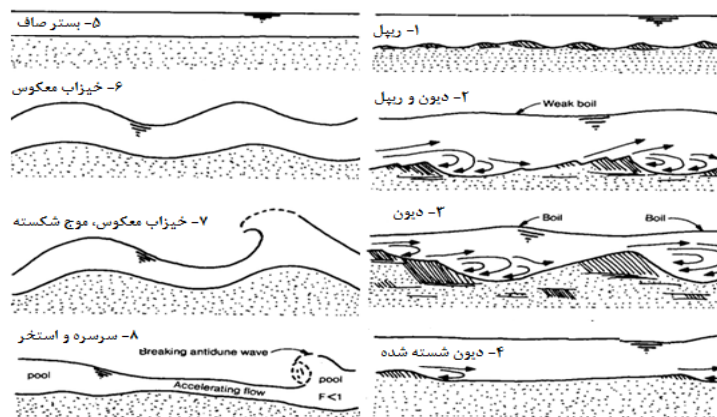
آنتیناکار و همکاران (۲) با توجه به پروفیل سرعت، جریان غلیظ را به دو بخش تقسیم کردند. قسمت اول از بستر تا ارتفاع بیشینه جریان غلیظ است (ناحیه دیواره) که آشفتگی جریان در این ناحیه ناشی از تأثیر بستر است و قسمت دوم از جایی که سرعت جریان غلیظ بیشینه است تا انتهای ارتفاع بدنه است (ناحیه جت) که آشفتگی آن ناشی از اصطکاک جریان با سیال پیرامون است (شکل ۱-ب). جریان غلیظ با حرکت خود منجر به تولید تنش در لایه تماس با سیال پیرامون می‌شود. انرژی حاصل از این تنش ها باعث ورود سیال پیرامون به درون بدنه جریان غلیظ خواهد شد که به کمک پارامتر شدت اختلاط بررسی می‌شود. البته ورود سیال پیرامون به درون جریان غلیظ را می‌توان با استفاده از قانون برنولی اثبات کرد. سیال پیرامون به دلیل حرکت نداشتن، فشار استاتیکی بیشتری نسبت به جریان غلیظ که متحرک است دارد. بنابراین گرادیان فشار ایجاد شده باعث نفوذ سیال پیرامون به درون جریان غلیظ می‌شود (۸).

شدت اختلاط جریان غلیظ و سیال پیرامون آن را که با E_w نشان داده می‌شود، ناشی از ناپایداری‌های حد فاصل جریان غلیظ و سیال ساکن بوده و به صورت نسبت سرعت اختلاط W_h به سرعت متوسط بدنه جریان غلیظ تعریف می‌شود (۲۲).

معادله بقای جرم برای جریان غلیظ را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\frac{dh}{dt} + \frac{d}{dx}(Uh) = W_h \rightarrow \frac{dh}{dt} + \frac{d}{dx}(Uh) = E_w U \quad (2)$$

و با توجه به این مسئله که جریان در بدنه جریان غلیظ به صورت



شکل ۲. انواع فرم بستر (جهت جریان از چپ به راست است) (۲۰)

کاسته شود. از این رو برای تحلیل جریان غلیظ در این شرایط، به محاسبه سرعت برشی (U_*) و تنش برشی بستر (τ_b) پرداخته شده است. مقدار تنش برشی در بستر رودخانه را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\tau_b = \tau_{bs} + \tau_{bf} \quad (5)$$

که در آن τ_{bs} بخشی از تنش برشی است که صرف مقاومت ذره می شود و τ_{bf} بخش دیگری از تنش برشی که صرف مقاومت فرم بستر می شود. به طور کلی در جریان پایدار در کانال های روباز، تنش برشی بستر از رابطه زیر حاصل می شود:

$$\tau_b = \rho U_*^2 = \rho g h S \quad (6)$$

در رابطه فوق، h عمق جریان و s شیب کانال است. البته این رابطه در جریان غلیظ، به دلیل فاکتور اختلاط جریان آب زلال با جریان غلیظ قابل استفاده نخواهد بود (۱۹). بنابراین باید فاکتور سرعت برشی (U_*) بستر به کمک تابع لگاریتمی سرعت و در ناحیه دیواره جریان محاسبه شود (رابطه ۷).

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{z}{K_s}\right) \quad (7)$$

در این معادلات، U سرعت متوسط جریان، K ضریب ون کارمن (۰/۴۰۵)، Z ارتفاع جریان، K_s ضریب زبری بستر است. همچنین، چگالی ذرات رسوب و چگالی جریان در نزدیکی بستر است. برای محاسبه τ_{bs} و τ_b معادلات تجربی زیادی وجود دارد که برای شرایط رودخانه ای با مصالح بستر رسوبی

اهمیت زیادی برخوردار است (۲۰). از آنجا که در مخازن سدها، زبری بستر با شکل گیری جریان غلیظ تغییر می یابد. بنابراین، شناخت فرم بستر و تأثیر آن بر مشخصه های جریان غلیظ از اهمیت زیادی برخوردار است. در شرایط بستر متحرک با افزایش سرعت یا قدرت جریان در واحد سطح بستر، فرم های بستر به شکل های مختلفی تشکیل می شوند (شکل ۲).

به طور کلی طبق آزمایش های سایمون و ریچاردسون شرایط جریان به سه صورت، رژیم جریان پایینی، انتقالی و رژیم جریان بالایی طبقه بندی می شود (۲۰). فرم های بستر که در هر یک از حالات فوق ممکن است تشکیل شود، عبارت است از:

الف: رژیم جریان پایینی: شکنج ها (ریپل)، تلماسه ها با شکنج ها در وجه بالادست (ریپل و دیون)، تلماسه ها (دیون)

ب: رژیم جریان انتقالی: فرم بستر ممکن است شکنج ها، بستر هموار و یا تلماسه شسته شده (دیون شسته شده)

ج- رژیم جریان بالایی: بستر هموار، پادتلماسه ها (آنتی دیون)، سرسره ها و استخرها

در تجزیه و تحلیل مشخصه های جریان غلیظ در یک بستر متحرک، این مسئله حائز اهمیت است که مقاومت در برابر جریان شامل دو بخش است: بخش اول زبری ناشی از اندازه ذرات و بخش دوم زبری به واسطه وجود شکل های بستر است (۲۱). همچنین، با افزایش سرعت جریان، زبری تولید شده همیشه افزایش نمی یابد، ممکن است با افزایش سرعت از زبری بستر

در این رابطه، Re عدد رینولدز، Re^* عدد رینولدز برشی، u^* سرعت برشی و v لزوجت سینماتیکی جریان است.

ب: با مشخص کردن دانه‌بندی رسوبات، باید محدوده انحراف استاندارد هندسی (σ_g) به‌گونه‌ای باشد که دانه‌بندی تقریباً یکنواخت باشد تا از پدیده سپری شدن (Armoring) نیز جلوگیری شود. بنابراین، بهتر است مقدار σ_g $\left(\sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}}\right)$ کمتر از ۱/۳۵ انتخاب شود (۱۲ و ۱۶). در این رابطه، d_{16} و d_{84} مربوط به اندازه رسوباتی هستند که به‌ترتیب ۸۴ درصد و ۱۶ درصد نمونه از آن ریزتر هستند. بنابراین، با توجه به سرعت‌های بسیار پایین در آزمایش‌های جریان غلیظ و اهمیت تشکیل فرم‌های بستر و بررسی جریان غلیظ در این شرایط، از ماده‌ای با قطر میانگین (d_{50}) برابر ۴۵۰ میکرومتر، چگالی مخصوص (ρ_s) برابر ۱۰۷۰ کیلوگرم بر مترمکعب و انحراف استاندارد (σ_g) برابر ۱/۴ استفاده شد.

مراحل انجام آزمایش

برای شبیه‌سازی جریان غلیظ از یک مدل آزمایشگاهی شامل یک فلوم با بستر شیب‌دار به طول ۷۸۰، ارتفاع ۷۰ و عرض ۳۵ سانتی‌متر استفاده شده است. تمامی تجهیزات آزمایشگاهی متعلق به آزمایشگاه تحقیقاتی هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز است. شیب فلوم در محدوده ۱- تا ۳/۸۶ درصد قرار دارد (شکل ۳).

فضای مناسب بستر متحرک به طول ۴/۵ متر از فاصله یک متری دریچه به ارتفاع هشت سانتی‌متر تعبیه شد. در ابتدای هر آزمایش، مواد بستر در فضای تعبیه شده جانمایی شده و سطح بستر کاملاً تسطیح می‌شد. سپس به کمک شیر انتهای فلوم، کل مخزن تا رقوم ثابتی از آب زلال پر می‌شد و به‌طور همزمان نیز مخزن اختلاط برای تهیه نمونه جریان غلیظ نمکی با غلظت مشخص در هر آزمایش آماده می‌شد. سپس سطح آب زلال و جریان غلیظ در یک ارتفاع قرار می‌گرفت و با استفاده از یک شیر و دبی سنج الکترومغناطیس میزان جریان ورودی به درون فلوم کنترل می‌شد.

معتبر هستند. از این‌رو، رابطه (۸) که توسط پژوهشگران برای محاسبه سرعت برشی در شرایط بستر متحرک گسترش داده شده است (۱۹) استفاده می‌شود. در محاسبه سرعت برشی به کمک این رابطه، نقاط پروفیل سرعت از سطح بالای فرم بستر تا رقوم معادل سرعت ماکزیمم به‌کار گرفته می‌شود (n تعداد رقوم مورد استفاده و U_i ، Z_i سرعت و رقوم نظیر آن در هر نقطه هستند):

$$U_* = k \frac{n \sum u_i \ln z_i - \sum u_i \sum \ln z_i}{n \sum \ln^2 z_i - (\sum \ln z_i)^2} \quad (8)$$

مواد و روش‌ها

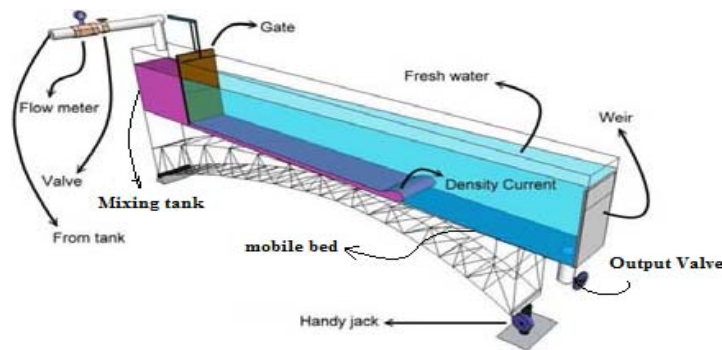
انتخاب مواد بستر فرسایش‌پذیر

در این تحقیق، ابتدا با توجه به شرایط ویژه جریان‌های غلیظ (سرعت‌های بسیار کم در فلوم‌های کوچک آزمایشگاهی)، تحقیقات جامعی در بخش تأمین مواد مناسب با قابلیت تشکیل فرم بستر ضمن حرکت جریان غلیظ صورت گرفت. با توجه به امکانات و محدودیت مواد مناسب برای شرایط آزمایشگاهی، مهم‌ترین نکات در انتخاب این مواد، جنس، دانه‌بندی، چگالی مخصوص، سهولت به‌کارگیری آنها است. بنابراین آزمایش‌های اولیه برای تهیه مواد مناسب به‌عنوان مصالح بستر به شرح زیر طراحی و اجرا شد:

تعیین معیارهای مناسب برای تهیه مواد بستر با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی جریان‌های غلیظ، مطالعات جامع در بخش مواد موجود که نزدیک به معیارهای تعیین شده باشد، انجام آزمایشات لازم نظیر تعیین دانه‌بندی ذرات، تعیین چگالی مخصوص ذرات و پیش‌آزمایش‌هایی برای امکان‌سنجی تشکیل فرم‌های بستر در شرایط متغیر هیدرولیکی. در مجموع، برای تعیین اندازه رسوبات مناسب بستر فرسایشی نکات زیر مورد توجه بوده است:

الف: ذرات کف باید به‌گونه‌ای انتخاب شوند که جریان در کل آزمایشات توربولنت و زیر باشد (۶).

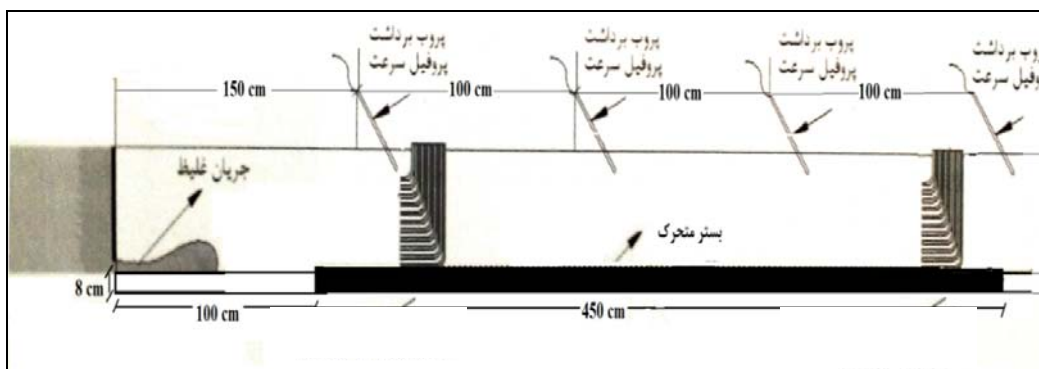
$$Re = \frac{Uh}{\nu} > 4000, Re_* = \frac{u_* d_{50}}{\nu} > 200 \quad (9)$$



شکل ۳. طرح شماتیک مدل فیزیکی مورد استفاده در این تحقیق

جدول ۱. محدوده اعداد فرود دنسیمیتریک و رینولدز در آزمایش‌ها

Re		Fra	
حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر
۲۸۶۰	۵۷۱۰	۰/۵۷	۱/۰۲



شکل ۴. طرح شماتیک محل قرارگیری پروپ‌های برداشت سرعت

بستر صلب برای دبی جریان (۱/۵ لیتر بر ثانیه) انجام شده است. در این تحقیق با توجه به نیاز برداشت پروفیل بدنه جریان غلیظ در دو مقطع از مسیر حرکت و به دلیل عدم تأثیرپذیری از جریان ورودی و خروجی، از داده‌های پروپ‌های دوم و سوم در فاصله ۲/۵ و ۳/۵ متری از دریچه استفاده شده است. طول پروپ مورد استفاده در این تحقیق ۹۰ میلی‌متر، قطر آن پنج میلی‌متر و بسامد آن چهار مگاهرتز است. این دستگاه برای برداشت تعداد ۱۰۰ عدد سرعت لحظه‌ای در هر فاصله از پروپ تنظیم شد و همچنین زاویه قرارگیری آن ۶۵ درجه نسبت به افق انتخاب شد (با توجه به کاتالوگ سرعت‌سنج Dop۲۰۰۰). در شکل (۴) محل

همچنین، پروفیل‌های سرعت در چهار مقطع (۱/۵، ۲/۵، ۳/۵ و ۴/۵ متری از دریچه) با کمک دستگاه سرعت‌سنج Dop۲۰۰۰ به روش اکوستیک اندازه‌گیری شده‌اند. به طور متوسط با گذشت ۱۰ دقیقه از شروع آزمایش و تثبیت شرایط بستر، نمونه‌گیری سرعت انجام می‌شده است. در جدول (۱) محدوده اعداد فرود دنسیمیتریک (Fra) و رینولدز (Re) آزمایش‌ها ارائه شده است. در مجموع ۴۸ آزمایش بهینه شامل ۳۶ آزمایش اصلی در شرایط بستر متحرک با متغیرهای دبی جریان (۱، ۱/۵ و ۲ لیتر بر ثانیه)، شیب کانال (۰، ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ درصد) و غلظت حجمی رسوبات (۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد) و ۱۲ آزمایش شاهد در شرایط

جدول ۲. تعیین نوع فرم بستر و تنش برشی بستر متحرک (دبی ۱/۵ لیتر بر ثانیه)

شیب	°	۱/۵ درصد	۲/۵ درصد	۳/۵ درصد
غلظت	نوع فرم بستر	تنش برشی	نوع فرم بستر	تنش برشی
۱۵ گرم بر لیتر	Ripple	۰/۱	Dune	۰/۶۵
۲۰ گرم بر لیتر	Ripple	۰/۱۵	Washed Dune	۰/۰۹*
۲۵ گرم بر لیتر	Ripple	۰/۴	plane	۰/۰۰۲*

* فرم بسترها شسته شده‌اند و اثر زبری فرم بستر کاملاً حذف شده است (شکل‌های ۵-ب).

جدول ۳. نتایج ضریب اختلاط در شرایط بستر صلب و متحرک (دبی ۱/۵ لیتر بر ثانیه)

غلظت	شیب	نوع بستر		
		۱/۵ درصد	۲/۵ درصد	۳/۵ درصد
۱۵ گرم بر لیتر	صلب	۰/۰۲۱	۰/۰۳	۰/۰۳۵
($\rho_f=1009 \text{ kg/m}^3$)	متحرک	۰/۰۱۵	۰/۰۴۳	۰/۰۴۵
۲۰ گرم بر لیتر	صلب	۰/۰۲۳	۰/۰۳۶	۰/۰۰۴
($\rho_f=1012 \text{ kg/m}^3$)	متحرک	۰/۰۲۸	۰/۰۰۳*	
۲۵ گرم بر لیتر	صلب	۰/۰۰۲	۰/۰۴۱	۰/۰۰۵
($\rho_f=1016 \text{ kg/m}^3$)	متحرک	۰/۰۱۴	۰/۰۰۲*	*

* فرم بسترها شسته شده‌اند و اثر زبری فرم بستر حذف شده است (شکل‌های ۵-ب).

قرارگیری پروب‌های سرعت مشخص شده است.

به تحلیل نتایج پرداخته شد.

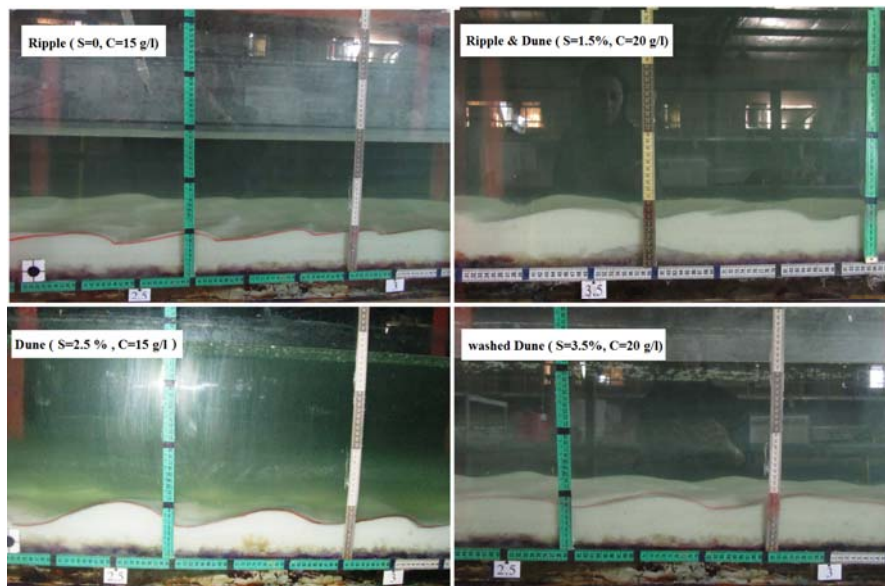
نتایج و بحث

همان‌طور که در جدول (۱) ملاحظه می‌شود تمامی آزمایش‌ها در حالت زیر بحرانی و آشفته قرار دارند. با توجه به تحقیقات انجام شده تاکنون، افزایش زبری دو تأثیر مهم روی جریان غلیظ دارد که در مقابل یکدیگر عمل می‌کنند:

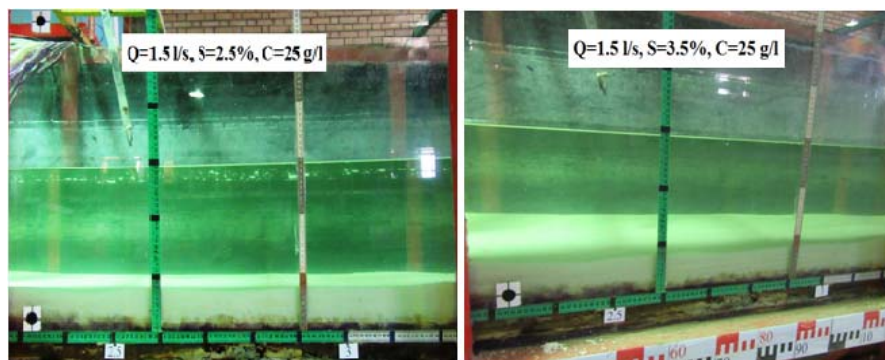
اول، افزایش زبری باعث کاهش سرعت و این کاهش منجر به افزایش عدد ریچاردسون و در نتیجه کاهش ضریب شدت اختلاط می‌شود و از طرف دیگر، افزایش زبری باعث افزایش تلاطم در فصل مشترک با سیال پیرامون گشته که این تلاطم اضافی منجر به افزایش ورود سیال پیرامون به درون جریان غلیظ و افزایش ضریب اختلاط می‌شود (۳). از این‌رو برای یافتن تأثیر بستر متحرک با تشکیل فرم بستر، ابتدا نوع فرم‌ها و تنش برشی بستر مشخص شدند (جدول ۲). سپس با محاسبه ضریب اختلاط در دو شرایط بستر صلب و متحرک (جدول ۳)

فرم بستر و تنش برشی بستر متحرک

معمولاً اصطلاحات متفاوتی برای انواع فرم بستر وجود دارد. از جمله آن، اصطلاحاتی است که توسط انجمن مهندسان عمران آمریکا برای شکل‌های مختلف فرم بستر به کار می‌رود که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. از این‌رو با توجه به مشخصات فرم بسترهای تشکیل شده، نوع فرم‌ها مشخص شدند (جدول ۲). نمونه‌ای از این فرم‌های بستر در شکل‌های (۵-الف) و (۵-ب) نشان داده شده است. با توجه به نتایج، در سرعت‌های کمتر که تنش برشی بستر نیز کمتر است، فرم بسترهای ریبیل تشکیل شده است. سپس با افزایش قدرت جریان، فرم بستر ریبیل به همراه دیون شکل گرفته است که سبب افزایش زبری و تنش برشی بستر نیز شده است. در ادامه، افزایش تنش برشی با شکل‌گیری فرم بستر کامل دیون افزایش یافته و بعد از آن، به تدریج با شسته شدن دیون‌ها، سطح بستر صاف شده است (کمترین



شکل ۵. الف) نمونه‌هایی از انواع بسترهای تشکیل شده پس از عبور جریان غلیظ



شکل ۵. ب) نمونه حذف فرم بسترها (شرایط بستر Plane)

در ابتدای بستر صلب یا بستر متحرک اندازه‌گیری شده است.

تأثیر نوع فرم بستر (مقایسه بستر صلب و متحرک)

الف- فرم بستر ریپل

با توجه به نتایج جدول (۳)، فرم بستر ریپل با افزایش زبری و مقاومت بستر و در نتیجه با جذب مومتم و افزایش فاکتور اصطکاکی، سبب کاهش سرعت بدنه جریان غلیظ نسبت به بستر صلب و در نتیجه کاهش ضریب شدت اختلاط شده است. این کاهش حدود ۲۵ درصد بوده است.

زبری و تنش برشی بستر). بدین ترتیب با محاسبه تنش برشی و نوع فرم‌های بستر، تغییرات زبری و مقاومت بستر در آزمایش‌ها تعیین شده شد. بنابراین در بخش بعدی، تغییرات ضریب‌های اختلاط با توجه به جدول (۲) تحلیل و بررسی می‌شود.

محاسبه ضریب شدت اختلاط

ضریب شدت اختلاط به کمک رابطه (۳) در دو شرایط بستر صلب و متحرک محاسبه شده است (جدول ۳) و پس از آن، پارامترهای هیدرولیکی مؤثر و نحوه اثربخشی آنها تحلیل شده است. قابل ذکر است که چگالی جریان غلیظ

افزایش یافته است و سبب تغییر زبری بستر شده است. عموماً با افزایش غلظت، تنش برشی بستر نیز افزایش یافته است تا جایی که، با شسته شدن دیون‌ها، زبری و تنش برشی نیز شروع به کاهش می‌کند.

تأثیر شیب کف فلوم

با افزایش شیب بستر، سرعت جریان غلیظ افزایش یافته است و عموماً سبب افزایش تنش برشی بستر و افزایش شدت اختلاط شده است (در غلظت ۱۵ گرم بر لیتر). اما در غلظت‌های دیگر، با افزایش شیب بستر، تنش برشی بستر کاسته شده و تأثیر بیشتری بر کاهش شدت اختلاط شده است. بنابراین با توجه به تأثیر پارامترهای فوق، این نتیجه حاصل می‌شود که ترکیب این پارامترها در تشخیص نوع فرم بستر و تأثیرگذاری بر ضریب اختلاط مؤثر هستند و به تنهایی، تأثیر مشخصی بر روند تغییرات ندارند.

محاسبه و تحلیل عدد ریچاردسون

شدت اختلاط تابعی از عدد ریچاردسون است و بر اساس نتایج سایر پژوهشگران با افزایش عدد ریچاردسون، ضریب اختلاط کاهش می‌یابد و بالعکس (۳، ۵ و ۱۰). از این رو در ادامه تحلیل نتایج، به ارتباط این دو پارامتر و مقایسه آنها در شرایط بستر صلب و متحرک پرداخته شده است (جدول ۴).

مقایسه عدد ریچاردسون در دو شرایط بستر صلب و متحرک

در تمامی آزمایش‌ها، عدد ریچاردسون جریان غلیظ در شرایط بستر متحرک نسبت به بستر صلب افزایش یافته است و این افزایش به نوع فرم بسترهای تشکیل شده وابسته است. به طوری که، بیشترین افزایش مربوط به فرم بستر دیون (حدود ۲۰ درصد) است و کمترین افزایش مربوط به شرایط بستر صاف (حدود ۵ درصد) و ریپل (حدود ۱۰ درصد) است.

ارتباط ضریب اختلاط با عدد ریچاردسون

طبق نتایج این تحقیق در شرایط بستر متحرک (جدول ۴)،

ب- فرم بستر ریپل و دیون

با تشکیل این فرم بستر طبق نتایج جدول (۲)، زبری و تنش برشی بستر افزایش یافته است و به دلیل تشکیل فرم بستر دیون همراه با ریپل، گردابه‌هایی در اطراف فرم بستر تشکیل می‌شود که با برهم زدن خطوط جریان، سبب افزایش نسبی تلاطم می‌شود. در این شرایط، تأثیر افزایش تلاطم بر افزایش زبری بستر غلبه کرده است و سبب افزایش شدت اختلاط شده است.

ج- فرم بستر دیون

با تشکیل فرم بستر کامل دیون به دلیل برهم خوردن خطوط جریان در اطراف فرم بستر، تلاطم در مقابل فرم‌ها و در ناحیه جدایی جریان افزایش می‌یابد و در نتیجه سبب افزایش شدت اختلاط می‌شود.

د- فرم بستر دیون شسته شده

از جایی به بعد با افزایش قدرت جریان، زبری و تنش برشی بستر کاسته می‌شود (جدول ۲) و دیون‌ها شروع به شسته شدن می‌کنند. در این شرایط همان‌طور که در نتایج آمده است، شدت اختلاط کاهش یافته است. یعنی در این شرایط تلاطم جریان در حدی نبوده است که بر اثر زبری بستر غلبه کند و سبب کاهش شدت اختلاط شده است.

ه- بستر صاف

پس از شسته شدن دیون‌ها با افزایش سرعت جریان، فرم‌های بستر به طور کامل شسته می‌شوند و اثر زبری فرم بستر حذف می‌شود و فقط زبری ذرات بستر باقی می‌ماند. در این صورت با کاهش اثر تلاطمی فرم بستر و حضور زبری ذرات بستر، شدت اختلاط نسبت به بستر صلب کاهش می‌یابد.

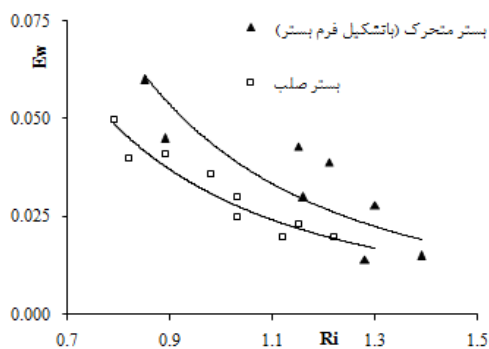
تأثیر غلظت جریان غلیظ

با توجه به نتایج در شرایط بستر متحرک عموماً با افزایش غلظت و در نتیجه افزایش سرعت جریان، قدرت جریان غلیظ نیز

جدول ۴. نتایج عدد ریچاردسون در شرایط بستر صلب و متحرک

شیب غلظت	نوع بستر	۰	۱/۵ درصد	۲/۵ درصد	۳/۵ درصد
۱۵ گرم بر لیتر	صلب	۱/۳	۱/۲۲	۱/۰۳	۰/۷۴
	متحرک	۱/۴۲	۱/۳۹	۱/۱۵	۰/۸۹
۲۰ گرم بر لیتر	صلب	۱/۲	۱/۱۵	۰/۹۸	۰/۸۲
	متحرک	۱/۳۳	۱/۳	۱/۱۶	۰/۹۴*
۲۵ گرم بر لیتر	صلب	۱/۱۲	۱/۰۳	۰/۸۹	۰/۷۹
	متحرک	۱/۲۸	۱/۲۱	۰/۹۵*	۰/۸۲*

* فرم بسترها شسته شده‌اند و اثر زبری فرم بستر حذف شده است (شکل‌های ۵-ب).



شکل ۶. تغییرات ضریب اختلاط در مقابل عدد ریچاردسون در بستر صلب و متحرک

دیون تشکیل شده باشد (شکل ۶).

مقایسه نتایج تحقیق با سایر پژوهشگران

نتایج این تحقیق مطابقت خوبی با نتایج سایر پژوهشگران نشان داده است. فقط در شرایط تشکیل فرم بستر، نشان می‌دهد در یک ریچاردسون ثابت، ضریب اختلاط مقدار بیشتری نسبت به نتایج سایر پژوهشگران دارد. در این تحقیق در یک ریچاردسون ثابت، مقادیر شدت اختلاط ($0.1 < E_w < 0.05$) تقریباً در مقایسه با نتایج مشابه پارکر و همکاران ($0.05 < E_w < 0.01$)، تا ۵۰ درصد افزایش داشته است.

نتیجه‌گیری

بستر متحرک با تشکیل فرم بستر و تأثیر بر زبری و تنش برشی بستر، سبب تغییرات مؤثری بر پروفیل سرعت بدنه جریان غلیظ و در نتیجه ضریب شدت اختلاط می‌شود. از این‌رو در این

تغییرات عدد ریچاردسون وابسته به تغییرات فرم بستر است. بدین ترتیب با تشکیل فرم بستر ریپل و دیون شسته شده که سبب کاهش شدت اختلاط نسبت به بستر صلب شده‌اند، ارتباط عدد ریچاردسون و ضریب اختلاط معکوس است. اما فرم بستر دیون سبب افزایش شدت اختلاط و متناسب با آن عدد ریچاردسون شده است (ارتباط مستقیم). علت آن مربوط به تأثیر افزایش زبری و تنش برشی بستر در افزایش مقاومت بستر و کاهش سرعت جریان است که در نتیجه آن، افزایش عدد ریچاردسون نسبت به بستر صلب رخ خواهد داد. در بستر صاف نیز به دلیل زبری ذرات بستر، رابطه معکوس وجود دارد (افزایش حدود پنج درصدی عدد ریچاردسون و کاهش حدود پنج درصدی شدت اختلاط). در مقایسه ارتباط این دو پارامتر، نشان داده شد در یک عدد ریچاردسون ثابت، تشکیل فرم‌های بستر سبب افزایش شدت اختلاط شده است. این افزایش می‌تواند تا ۵۰ درصد هم اتفاق بیفتد، البته در مواردی که فرم بستر

تحقیق، پس از بررسی انواع فرم بسترها و اثربخشی آنها، تغییرات ضریب شدت اختلاط و عدد ریچاردسون تحلیل شد و نتایج زیر حاصل شد:

محاسبه تنش برشی بستر نشان داد، تغییرات زیری بستر وابسته به نوع فرم بستر تشکیل شده است. کمترین زبری و تنش برشی بستر در بستر صاف و فرم بستر ریپل و بیشترین زبری بستر در فرم بستر دیون مشاهده شد.

تغییرات تنش برشی بستر به خوبی نشان داد، افزایش تنش برشی در بستر صاف و فرم‌های ریپل و دیون شسته شده، سبب افزایش مقاومت بستر و کاهش سرعت جریان و در نتیجه کاهش ضریب اختلاط می‌شود (تا حدود ۲۵ درصد کاهش).

افزایش تنش برشی بستر در فرم‌های ریپل به‌همراه دیون و دیون کامل سبب افزایش تلاطم جریان و افزایش اختلاط جریان زلال می‌شود. این امر سبب شده ضریب اختلاط نسبت به بستر صلب تا حدود ۳۰ درصد افزایش یابد.

نتایج نشان داد، پارامترهای هیدرولیکی مؤثر نظیر غلظت جریان غلیظ و شیب بستر به‌تنهایی اثر مشخصی بر روند تغییرات ضریب اختلاط ندارند و باید تأثیر این پارامترها باهم و در

تشکیل نوع فرم بستر بررسی شوند. در تمامی آزمایش‌ها، عدد ریچاردسون جریان غلیظ در شرایط بستر متحرک نسبت به بستر صلب افزایش یافته است و این افزایش به نوع فرم بسترهای تشکیل شده وابسته است. به‌طوریکه، بیشترین افزایش مربوط به فرم بستر دیون (حدود ۲۰ درصد) و کمترین افزایش مربوط به شرایط بستر صاف (حدود ۵ درصد) و ریپل (حدود ۱۰ درصد) بوده است.

در مقایسه ارتباط دو پارامتر شدت اختلاط و عدد ریچاردسون نشان داده شد در یک عدد ریچاردسون ثابت، تشکیل فرم‌های بستر سبب افزایش شدت اختلاط شده است. این افزایش می‌تواند تا ۵۰ درصد هم اتفاق بیفتد، البته در مواردی که فرم بستر دیون تشکیل شده باشد.

در مقایسه نتایج این تحقیق با نتایج سایر پژوهشگران نشان داده شد، ضریب اختلاط در شرایط بستر متحرک با تشکیل فرم بستر در یک ریچاردسون ثابت، مقدار بیشتری داشته است و در مقایسه با نتایج مشابه (۱۵)، حدود ۵۰ درصد افزایش داشته است.

منابع مورد استفاده

1. Akiyama, J. and H. G. Stefan. 1985. Plunging flow into a reservoir: Theory. *Journal of Hydraulic Engineering* 110(4): 484-499.
2. Altinakar, M. S., W. H. Graf and E. J. Hopfinger. 1996. Flow structure in turbidity currents. *Journal of Hydraulic Research* 34:713-718.
3. Daryaei, M., S. M. Kassefi-pour and M. Ghomshi. 2015. Experimental study on the effect of roughness height on the water entrainment and control of density current discharge. *Water and Soil Science-University of Tabriz* 25(1): 99-111 (In Farsi)
4. Ellison, T. H. and J. S. Turner 1959. Turbulent entrainment in stratified flows. *Journal of Fluid Mechanics* 6: 423-448.
5. Fernandez, R. L. and J. Imberger. 2006. Bed roughness induced entrainment in a high Richardson number underflow. *Journal of Hydraulic Research* 44(6):725-738.
6. Garcia, M. H. 2008. Sedimentation Engineering. ASCE manual 110. Chapter 2. Reston Va.
7. Garcia, M. H. and G. Parker. 1993. Experiments on the entrainment of sediment into suspension by a dense bottom current. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978-2012). 98(C3). 4793-4807.
8. Graf, W. H. 1983. Hydraulics of reservoir sedimentation. *International Water Power & Dam Construction* 35(4): 45-52.
9. Huang, H., J. Imran and C. Pirmez. 2012. The depositional characteristics of turbidity currents in submarine sinuous channels. *Journal of Marine Geology* 329-331.
10. Kaheh M., M. Ghomeshi and S. H. Musavi Jahromi 2012. Experimental investigation of gravity current dynamics on rough beds. PhD. Thesis, Chamran University. Ahwaz.

11. Kneller, B. C., S. J. Bennett and W. D. McCaffrey. 1999. Velocity structure. Turbulence and fluid stresses in experimental gravity currents. *Journal of Geophysic. Research* 104(C3): 5381–5391.
12. Little, W. C. and P. G. Mayer. 1976. Stability of channel beds by armoring. *Journal of Hydraulic. Engineering* 102(11):1647–1661.
13. Lu, J., X. Liao and G. Zhao. 2013. Experimental study on effects of geometric distortion upon suspended sediments in bending channels. *Journal of Sedimentary Geology* 294: 27–36.
14. Oehy, Ch. and A. Schleiss. 2004. Management of reservoir sedimentation due to turbidity currents by technical measures. *Hydraulics of Dams and River Structures* 3(2): 263-270.
15. Parker, G., M. Garcia., Y. Fukushima and W. Yu. 1987. Experiments on turbidity currents over an erodible bed. . *Journal of Hydraulic Research* 25(1): 123–147.
16. Parker, G. and A. J. Sutherland. 1990. Fluvial armor. *Journal of Hydraulic Research* 28(5):529–544.
17. Rastello, M., C. Ancey, F. Ousset, R. Magnard and E. J. Hopfinger. 2002. An experimental study of particle driven gravity currents on steep slopes with entrainment of particles. *Journal of Natural Hazards and Earth System* 2:181-185.
18. Sequeiros, O., B. Spinewine, R. Beaubouef, T. Sun, M. Garcia and G. Parker. 2010a. Characteristics of velocity and excess density profiles of saline underflows and turbidity currents flowing over a mobile bed. *Journal of Hydraulic Engineering* 136(7):412-433.
19. Sequeiros, O., B. Spinewine, R. Beaubouef, T. Sun, M. Garcia and G. Parker. 2010b. Bedload transport and bed resistance associated with density and turbidity currents. *Sedimentology* 57: 1463–1490.
20. Shafae bejestan, M. 1999. Sediment Hydraulic. Chamran University Press, Ahvaz. (In Farsi).
21. Shafae bejestan, M. 1999. Hydraulic of Sediment Transport. Chamran University Press, Ahvaz. (In Farsi).
22. Turner, J. S. 1973. Buoyancy Effects in Fluids. Cambridge University Press, London, U.K.
23. Varjavand, P. 2012. Experimental Study on Density Current. PhD. Thesis, Tabriz University, Tabriz.
24. Xu, J. P., O. E. Sequiros and M. A. Noble. 2014. Sediment concentrations, flow condition and downstream evolution of two turbidity currents, Monterey canyon, USA. *Journal of Science Direct Deep-Sea Research* 1 89: (11-34).

Experimental Analysis on the Water Entrainment of Turbidity Current over a Mobile Bed

A. Sharifnezhad*, S. M. Kashefipour and M. Ghomeshi¹

(Received: October 14-2017 ; Accepted: May 16-2018)

Abstract

Study of Turbidity Current, as one of the most important phenomena affecting the sedimentation in the reservoirs of dams, is essential. Since most of the research studies have been conducted under experimental conditions on rigid beds, the effect of erodible bed and the formation of the bed form on the turbidity current specifications is not yet clear. Therefore, in this Research, the study of the turbidity current in two conditions of rigid and mobile bed was conducted in order to determine water entrainment specification and the effective hydraulic parameters. The results showed that water entrainment changes depended on the variation of bed roughness and the type of bed form. Also, water entrainment of turbidity current was initially reduced by about 25% with the change in the bed shear stress, relative to the rigid bed, due to formation of small bed forms; then, it increased by about 30%, forming the larger bed forms; finally it decreased with increasing the flow strength and removing the bed forms. In addition, comparison of the results of the present study with previous research showed that the formation of bed forms increased water entrainment in a constant Richardson number up to 50%.

Keywords: Turbidity current, Water entrainment, Richardson number, Mobile bed, Bed form

1. Hydraulic Structures Department, Water Sciences Engineering Faculty, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

*: Corresponding Author, Email: a.sharifnezhad@yahoo.com